

表4 PB-1 NO.8526 实测指标

*探头直径 ϕ (mm)	12
单层 PVDF 厚度 (μm)	90
PVDF 层数 N	9
**阻抗 $ Z $ (k Ω)	1.8
接收电压灵敏度 (dB)	-210
谐振频率 (kHz)	640
3dB 通带 (kHz)	440
通带 Q 值	1.5
电声效率 η_{ae}	10%
600kHz 波束开角(度)	19
最大发送电压响应 (dB)	140.2
自重 (N)	1.5

* 球冠面硬背衬,

** 64kHz 测定值.

表5 PVDF-DMOS NO.8504 实测指标

圆盘接收面直径 ϕ (mm)	10
单层 PVDF 厚度 (μm)	75
PVDF 层数 N	1
DMOS 增益(倍)	18
*接收电压灵敏度 (dB)	-189.4 $\pm$ 1.3
200kHz 波束开角(度)	34
端折算自噪声 (μV)	<15
电缆长度 (m)	2.5
前放输出阻抗 (k Ω)	2
供电电压(直流, V)	12
自重 (N)	约 1.5

* 指在 100kHz—1MHz 频段,由国家计量总局成都计量测试研究院测定.

干涉波分辨得非常清楚.

六、结 论

1. PVDF 声阻抗与水接近,采用 $\lambda/4$ 振型

慢波导环形换能器及其指向性

陈 培 田

(国家海洋局海洋技术研究所)

1985 年 1 月 21 日收到

本文介绍了一种慢波导环形换能器及其指向性,文中给出了该换能器的结构及其指向性实验结果.实验结果表明,利用声学慢波导能够有效地改善环形换能器的指向性.文中对该换能器指向性形成的机理做了初步分析.

应用声学

及恒电流源激励, PB-1 型发射换能器有宽的发送频响;

2. 采用多层 PVDF 结构后,降低了电阻抗,增大了单位电压下的声功率输出;

3. 采用球冠面的声辐射形式,除增大波束开角,还保证了多层结构工艺实施;

4. 采用窄脉冲电信号激励 ($1\mu\text{s}$),在 PB-1 型换能器收发系统中实现了 7—10 μs 的水中窄脉冲波形.提高了多层地震模型实验层间的反射脉冲分辨力,甚至能观察到各种波的干涉现象;

5. 因本文 PVDF 压电性能已有提高, PB-1 型换能器电声效率已达 10—12%. 此点有特别重要实用意义.但为了更广应用,仍需继续改进性能.

参 考 文 献

- [1] G. M. Sessler, *J. Acoust. Soc. Am.* 70(1981), 1596.
- [2] R. G. Swartz and J. D. Plummer, *IEEE Transactions on Electron Devices*, ED-26-12(1978), 1921.
- [3] H. R. Gellantree, *Marconi Rev.* 45(1982), 49.
- [4] R. G. Swarty, *IEEE Trans. on Sonics and Ultrasonics*, SU-27-6 (1980), 295.
- [5] Chen Wen-Hsien, *IEEE Trans. on Sonics and Ultrasonics*, SU-30-4 (1983), 238.
- [6] J. G. Linvill, S. E. L. Stanford Univ., 3(1978), 83.
- [7] D. Berlincourt, "Piezoelectric Crystals and Ceramics" in *Ultrasonic Transducer Materials*, O. E. Mattiat, Ed., New York: Plenum Press, 1971, 74.
- [8] 何祚镛、赵玉芳, *声学理论基础*, 国防出版社, 1981, 212.
- [9] 袁易全、沈寿彭, *应用声学*, 4-3(1985), 25.
- [10] L. Bui, H. J. Shaw, and L. T. Zitelli, *Electron. Lett.*, 12(1976), 393.

一、引言

自由淹没式环形换能器,目前在水声工程中得到广泛地应用.这种换能器由于其性能不受静水压的影响,因而不论在深、浅水域中均能适用.但是,这种换能器由于其轴向响应太低(图 3a),因而使得其应用范围受到一定的限制.如果能够克服这一不足,显然是很有意义的.

在自由淹没式环形换能器的轴向上,同轴地设置一个甲基硅油液体圆柱声学慢波导,将能显著地提高该换能器的轴向响应,是一种改善自由淹没式环形换能器指向性的有效方法(见图 3b).另外,中国科学院声学研究所梁希庭等利用固体的硅橡胶声学慢波导改善环形换能器的指向性,也取得了明显效果(见声学所研究报告 SH820136, 1982. 10.).这种由自由淹没式环形振子和慢波导组合而成的换能器,我们简称为慢波导环形换能器.选用适当长度的慢波导,几乎可以使换能器具有全向性.

二、慢波导环形换能器的结构

我们设计的慢波导环形换能器如图 1 所示,整个换能器主要由以下几部分组成(图 2).其中慢波导腔体的半径与自由淹没式环形换能器的内半径相等,并且通过螺钉结构与环形换

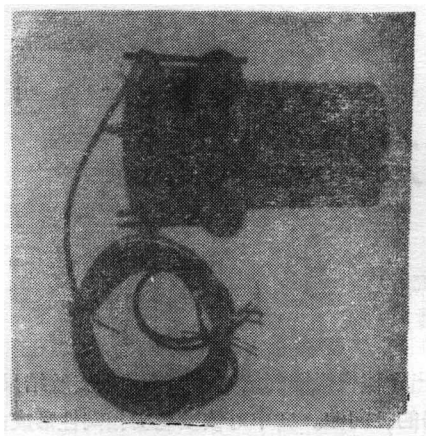


图 1 换能器照片

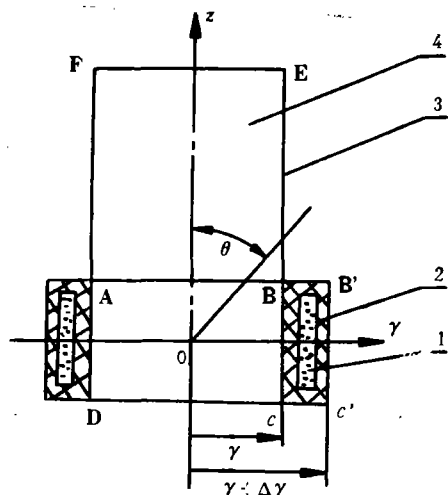


图 2 换能器结构示意图

1. PZT 压电陶瓷园环; 2. 聚氨酯水密包敷胶层;
3. 透声橡胶慢波导腔体; 4. 甲基硅油(慢波导介质).

能器同轴联接.

三、慢波导环形换能器指向性形成机理的初步分析

慢波导环形换能器是由慢波导和自由淹没式环形换能器组合而成的,其辐射声场的特性因而取决于二者各自的声学特性及其相互作用.

1. 自由淹没式环形换能器的指向性

我们采用的自由淹没式环形换能器是一种壁厚远小于半径及波长、高度也小于半径及波长的环形振子,因此可以作以下近似:(1)在谐振频率附近可以忽略因环壁厚的胀缩而引起的辐射;(2)环振子上、下端面 BB' 和 CC' 上的声辐射可以忽略不计,(3)环振子内柱面 BC 和外柱面 $B'C'$ 上的振速大小相等,但相位相差 180° .根据以上近似,我们可以把换能器的辐射声场看作分别由环形换能器内、外柱面(BC 和 $B'C'$)所构成的两个单面圆环形声源辐射声场的叠加,这两个圆环的半径相差一个环壁的厚度(即 BB').

对于单面辐射的环形声源,其指向性函数为

$$D_r(\theta) = J_0(kr \sin \theta) \quad (1)$$

其中 J_0 为零阶第一类 Bessel 函数; k 为波数; r 为辐射环面的半径; θ 为相对环对称轴正向的方位角(图 2). 自由淹没式环形换能器的指向性函数于是为

$$D(\theta) = J_0(kr \sin \theta) - J_0[k'(r + \Delta r) \sin \theta] \quad (2)$$

其中 r 为换能器环振子的内半径, Δr 等于环振子的壁厚.

我们将式(2)中的第二项 $J_0[k(r + \Delta r) \sin \theta]$ 用 Taylor 级数展开

$$J_0[k(r + \Delta r) \sin \theta] = J_0(kr \sin \theta) - (k\Delta r \sin \theta)J_1(kr \sin \theta) + \dots \quad (3)$$

然后将式(3)代入式(2)中并取式(3)中的前两项作近似, 就可得到自由淹没式环形换能器的指向性函数为:

$$D(\theta) \approx \sin \theta J_1(kr \sin \theta) \quad (4)$$

本指向性函数所对应的指向性图如图 3(a) 所示(虚线). 同时图中给出了换能器指向性的实际测量结果(实线).

2. 慢波导的声学特性

Jacobi 曾对几种不同类型边界条件的声波导进行了分析和研究^[1]. 对于“浸没在无限液体介质中的轴对称液体圆柱”这样一种声波导, 圆柱内、外介质中的声场势函数 ϕ^I 和 ϕ^{II} 可以分别表示为

$$\phi^I = A^I J_0[(k_1^2 - \beta^2)^{1/2} r] \exp(j\beta z) \quad (5)$$

$$\phi^{II} = A^{II} H_0^{(1)}[(k_2^2 - \beta^2)^{1/2} r] \exp(j\beta z) \quad (6)$$

其中 k_1 和 k_2 分别为波导内、外介质中的波数; $H_0^{(1)}$ 为零阶第一类 Hankel 函数; β 为介质中沿波导纵向的相位常数. 由波导边界条件所决定的特征方程为

$$\frac{x J_1(x)}{J_0(x)} = \frac{j(C^2 - x^2)^{1/2} H_1^{(1)}[j(C^2 - x^2)^{1/2}]}{(\rho_2/\rho_1) H_0^{(1)}[j(C^2 - x^2)^{1/2}]} \quad (7)$$

其中 $x = (k_1^2 - \beta^2)^{1/2} a$; $(8-a)$

$$j(C^2 - x^2)^{1/2} = (k_2^2 - \beta^2)^{1/2} a; \quad (8-b)$$

$$C = (\omega a / c_1 c_2)(c_2^2 - c_1^2)^{1/2} \quad (8-c)$$

这里, a 为液体圆柱的半径, ω 为角频率, c_1 、 c_2 分别为波导内、外介质中的声速. 根据给定的频率 ω , 由式(8-c)可求得 C , 再由式(7)可

求得特征值 x , 然后由式(8-a)可求得相位常数 β .

文献[1]指出, 如果在波导中存在被导波, 必须满足条件: $(C^2 - x^2) > 0$ 和 $c_2 > c_1$, 并且由此对每一个特征值 x , 可求得一个实数的 β 值. 因此, 我们根据关系式(8-b)可以得出: $\beta > k_2$. 从而不难看出, 液体圆柱波导中被导简正波的相速度 $C_{ph} = \omega / \beta$ 将小于液体圆柱外部介质的声速 c_2 , 即在浸没于无限液体介质中的液体圆柱波导内, 如果有被导波存在, 那么该波导必定是一个“慢”波导. 同时, 由于 β 是一个实数, 由式(5)可以看出, 圆柱波导内的声场势函数 ϕ^I 不会在沿波导传播的过程中发生衰减(这里我们假设液体介质是无粘滞性的). 在波导内、外液体介质的声阻抗不相等的情况下(本文中 $\rho_2 c_2 > \rho_1 c_1$), 被导波在圆柱波导的柱面边界上将不断出现反射.

3. 慢波导对自由淹没式环形换能器指向性的调节作用

自由淹没式环形换能器的指向性如式(4)所示, 其图形约呈“ ∞ ”字型(图 3a). 究其原因, 是由环振子内、外柱面上振速的相位相差 180° 所造成的.

慢波导环形换能器是由自由淹没式环形换能器和甲基硅油液体圆柱构成的(图 2). 甲基硅油的声速比水(换能器使用时的工作介质)的声速小, 因此作为浸没于无限介质中的甲基硅油液体圆柱, 具备了成为一个慢波导的物理条件. 这时, 换能器内腔中的声场, 在腔口 AB 处成为慢波导 $ABEF$ 的激励源, 激励了慢波导内的被导波.

慢波导内介质中的相速度小于外部介质的声速, 因此, 环振子内腔中的波动经过慢波导之后将发生相位的延迟, 从而使得在正轴向上, 由环振子内、外柱面所激发的两个声场之间的相位关系发生了变化, 减弱了声场的抵消作用, 提高了轴向响应. 在这里, 对自由淹没式环形换能器来说, 慢波导作为外加的一个声学元件, 有效地改变了换能器辐射声场的空间分布. 如果使用长度适当的慢波导, 可以使换能器得到几

乎全向性的指向性。

对于慢波导环形换能器的辐射声场,作者曾利用数值求解的方法进行过理论计算^[2],计算结果与实验结果基本一致。

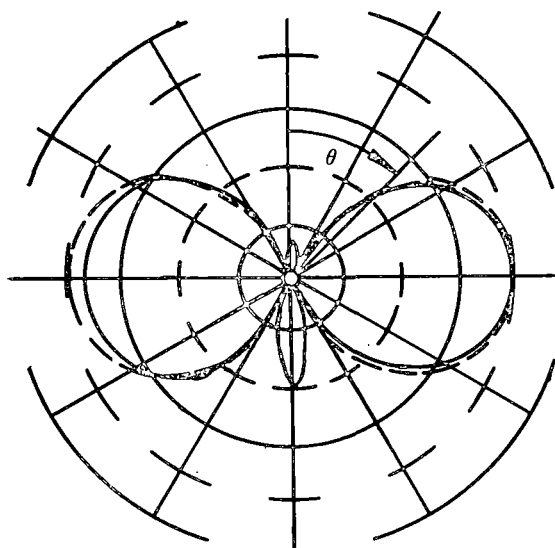
四、实验结果

根据上述机理,我们设计了图1所示的慢波导环形换能器。自由淹没式环形振子由平均直径6.6cm,壁厚0.4cm,高度2.5cm的PZT

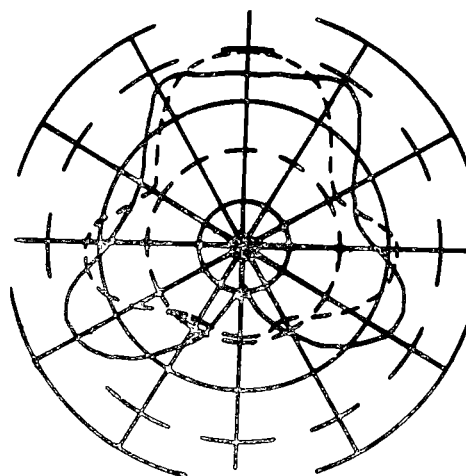
圆环形压电元件,采用0.4cm厚的聚氨脂胶层包敷而成的,换能器在水中的谐振频率约为14.5KHz。慢波导腔体由透声橡胶模压而成,腔体半径与自由淹没式环振子的内半径相等,腔体内充注甲基硅油。

实际测得的换能器在14.5kHz频率上的指向性如图(3b)所示,测量工作是在中国科学院声学所进行的。

从图3可以看出,慢波导对自由淹没式环形换能器指向性的改善作用是十分显著的。



(a)



(b)

图3 换能器的指向性
——测量值计算值^[2]
(a) 无慢波导 (b) 带有5cm长慢波导

五、结束语

利用慢波导改善自由淹没式环形换能器的指向性,是一种简便易行的好方法.由此而制作的慢波导环形换能器可以成为一种无指向性换能器。这种换能器不但可以用于浅水域,也可以用于深水中。由于慢波导和自由淹没式环振子采用各自独立的结构,换能器的组装和使用也比较方便。

本文的慢波导是由液态的甲基硅油构成的,利用硅橡胶制作的固态慢波导同样可取得

很好的效果,这二者指向性形成的机理应当基本相同。

关于慢波导环形换能器辐射声场指向性的理论计算,作者另有专文论述^[2],这里不再赘述。

参考文献

- [1] W. J. Jacobi, *J. Acoust. Soc. Am.*, 21-2(1949), 120.
- [2] 陈培田,第四届全国声学学术会议论文摘要,1985,45.